



AUX SOURCES DE LA LUNE

RENCONTRE AVEC THÉIA ?

Comment un objet tel que la Lune s'est-il retrouvé en orbite autour de la Terre ? Ou, dit autrement, comment et où notre satellite s'est-il formé ? Les missions *Apollo* ont apporté de précieux indices permettant de répondre à ces questions, privilégiant l'hypothèse d'un impact géant. Des zones d'ombre demeurent cependant, et il sera sans doute nécessaire de retourner sur la Lune pour les éclaircir.

Le couple Terre-Lune fait figure d'exception dans le Système solaire. C'est le seul exemple d'une planète tellurique, notre Terre, accompagnée d'un gros satellite, la Lune. Phobos et Deimos, les deux satellites de Mars, sont de petits objets apparentés à des astéroïdes. Ganymède et Titan sont plus gros que la Lune, mais d'une part, ils gravitent autour de planètes géantes gazeuses, Jupiter pour le premier et Saturne pour le second, et d'autre part ils ne représentent que 0,008 % et 0,02 % de la masse de ces planètes, autrement dit presque rien. La masse de la Lune représente, elle, 1,2 % de la masse de la Terre. Comment un si gros objet a-t-il pu se retrouver en orbite autour de la Terre ? Ou, ce qui revient au même, comment et où la Lune s'est-elle formée ? Pour répondre à ces questions, les scientifiques disposent de plusieurs indices, dont beaucoup ont été fournis par



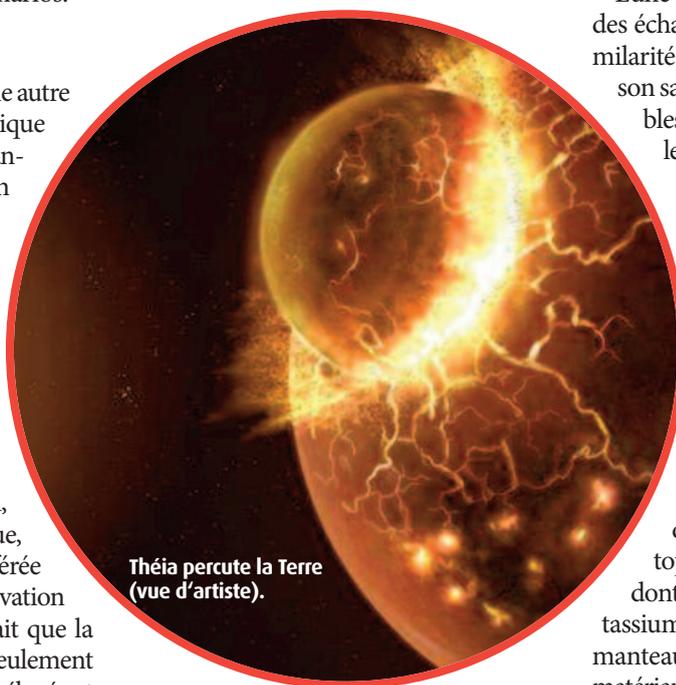
les missions spatiales, et notamment les missions *Apollo*. L'hypothèse qui est aujourd'hui privilégiée est celle d'un impact géant survenu très tôt après la formation de la Terre (ou plus précisément de la proto-Terre). Ce scénario fait l'objet d'un consensus assez large, au moins dans ces grandes lignes, mais comme nous le verrons, il s'est imposé assez tardivement, au début des années 2000, et il n'est pas exempt de difficultés. Mais revenons d'abord sur les indices dont nous disposons, ainsi que sur les autres scénarios.

DE PRÉCIEUX INDICES

Le couple Terre-Lune possède une autre particularité : son moment cinétique élevé. Le moment cinétique (ou angulaire) mesure l'état de rotation d'un système (encadré), et dans le cas d'un système isolé, il se conserve au cours du temps. Le moment cinétique du système Terre-Lune se compose des rotations propres de la Terre et de la Lune, et du mouvement de la Lune autour de la Terre. La contribution de ce dernier est particulièrement importante, et si, par un coup de baguette magique, la Lune était intégralement transférée à l'intérieur de la Terre, la conservation du moment cinétique imposerait que la Terre tourne sur elle-même en seulement 4 heures. Ce moment cinétique élevé est un indice capital pour reconstruire l'histoire du couple Terre-Lune. Par ailleurs, l'évolution de l'orbite lunaire fournit une autre information importante : sous l'effet des forces de marée, la Lune s'éloigne de la Terre d'environ 4 cm par an. Il y a 4,5 milliards d'années, peu après la formation de la Terre, elle devait donc être beaucoup plus proche de la Terre.

Les autres indices dont disposent les scientifiques reposent principalement sur

la structure et la composition de la Terre et de la Lune. Ainsi, la Lune a une masse volumique beaucoup plus faible que celle de la Terre [1]. Cela signifie que, par rapport à la Terre, la Lune est appauvrie en fer. Dans la Terre, le fer se concentre dans un gros noyau partiellement liquide et dont le rayon atteint 3 480 km, soit un peu plus de 50 % du rayon terrestre. La formation de ce noyau est intervenue très tôt dans l'histoire de notre planète, tout au plus quelques dizaines de millions d'an-



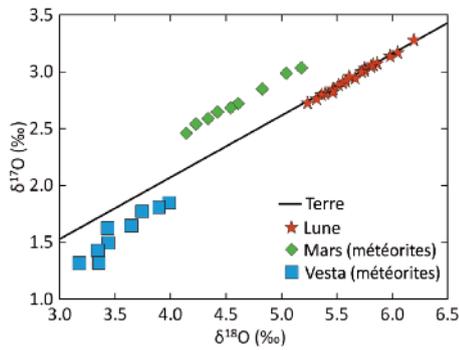
Theïa percute la Terre (vue d'artiste).

nées après son accréation, c'est-à-dire avant que la Lune elle-même ne se forme. Un peu de fer est bien sûr resté dans le manteau sous forme d'oxydes, essentiellement de l'oxyde ferreux FeO. La Lune possède également un noyau métallique, mais proportionnellement beaucoup plus petit que celui de la Terre, de l'ordre de 300-400 km pour un rayon lunaire de 1 737 km.

Une contribution inestimable des missions *Apollo* est d'avoir rapporté des échantillons de roches dont l'analyse, au fil des années, a permis de mieux contraindre la composition de la Lune. Ainsi, bien que la Lune soit globalement appauvrie en fer, il est apparu que les mers et le manteau lunaires sont plus riches en oxyde ferreux (FeO) que leur homologue terrestre. À 13 %, l'abondance lunaire en FeO se situe à mi-chemin entre celles de Mars (18 %) et du manteau terrestre (8 %).

L'une des surprises révélées par l'analyse des échantillons lunaires est la grande similarité de composition entre la Terre et son satellite concernant les isotopes stables. Par exemple, les rapports entre les abondances des trois isotopes de l'oxygène, ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O , que l'on mesure habituellement avec les rapports $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$ [2], suivent des tendances identiques sur Terre et sur la Lune. Plus précisément, lorsque l'on représente l'un en fonction de l'autre, les rapports $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mesurés pour différents échantillons terrestres et lunaires se situent sur une même droite (fig. 1). Cette proximité isotopique s'étend à d'autres éléments, dont le chrome, le titane, le fer et le potassium, et elle suggère que la Lune et le manteau terrestre sont issus d'un même matériau. Elle est toutefois surprenante car les mesures réalisées sur les météorites et les échantillons martiens montrent, au contraire, de grandes disparités dans les matériaux sources utilisés pour former la Terre et Mars, différences que l'on interprète généralement par un fractionnement isotopique lié à la distance au Soleil.

La croûte lunaire, que l'on identifie aux terres lunaires, est formée d'anorthosite, une roche essentiellement composée de feldspaths, et plus particulièrement de



1. Comparaison des rapports isotopiques $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$ de l'oxygène sur la Terre, la Lune, Mars et Vesta. Le fait que, pour un objet donné, les rapports $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$ s'alignent le long d'une droite indique que le matériau constitutif de cet objet est issu d'une même source. La dispersion des mesures le long d'une même droite est liée à un fractionnement ultérieur, suite à un événement particulier, du volcanisme par exemple. Dans ce cas, les abondances des isotopes ^{17}O et ^{18}O par rapport à ^{16}O sont modifiées, mais dans des proportions identiques. D'après Wiechert *et al.* (2001), *Science* 294, 345-348.

plagioclases. Ces minéraux silicatés, riches en calcium, en sodium et en aluminium, sont légers par rapport aux autres minéraux, notamment l'olivine. Dans un magma, ils remontent en surface où ils flottent et se concentrent pour former, lorsque le magma se refroidit, une croûte solide [3]. Le fait que la croûte lunaire soit principalement composée de plagioclases montre que, tôt dans son histoire, le manteau lunaire a été partiellement fondu, c'est-à-dire qu'il est passé par une phase d'océan magmatique. Maintenir un océan magmatique nécessite un apport d'énergie très important, que les mécanismes de formation lunaire doivent expliquer.

Enfin, la Lune apparaît comme un monde sec, dépourvu d'eau. C'est du moins ce que l'on pensait jusqu'à récemment. En 2008, la sonde indienne *Chandrayaan-1* a mis en évidence la présence d'eau, sous forme de glace, au fond de plusieurs cratères situés près du pôle Nord. Un an plus tard, c'est au tour de la sonde de la Nasa *LCROSS* (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite) de détecter de l'eau près du pôle Sud. L'origine de l'eau lunaire n'est pas connue. Elle pourrait très bien avoir été apportée par les météorites lors du bombardement tardif, donc bien après la formation de la Lune.

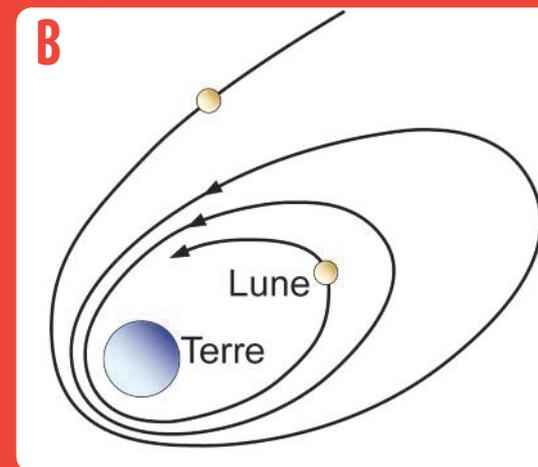
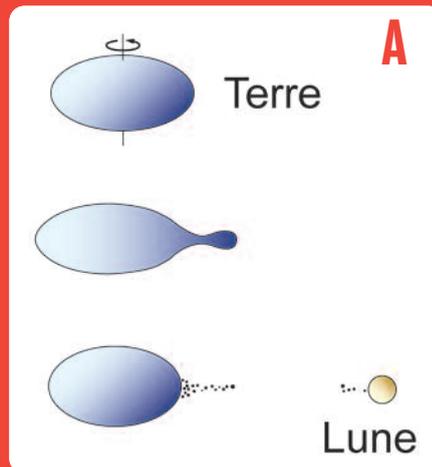
LES TROIS HYPOTHÈSES CLASSIQUES

À la fin des années 1960, les scientifiques étaient partagés entre trois grands scénarios de formation (figure 2) : l'hypothèse d'une fission entre la Terre et la Lune ; celle de la capture de la Lune par la Terre ; et enfin l'accrétion séparée de ces deux objets, mais dans des régions voisines. Aucune de ces hypothèses ne s'imposait véritablement, et chacune d'entre elles posait des problèmes importants. L'un des objectifs scientifiques clairement établis des missions *Apollo* était de mieux comprendre la formation et l'évolution de la Lune grâce à la collecte et à l'analyse de roches lunaires. Celles-ci devaient, pensait-on, pouvoir départager les différents scénarios envisagés à cette époque.

- **Fission.** Le fait que la Lune s'éloigne de la Terre n'avait pas échappé au géophysicien et astronome George Darwin, fils de Charles, et dont les travaux ont notamment permis de mieux comprendre les marées [4]. George Darwin a poussé cette observation jusqu'à sa conséquence logique en supposant que la Lune est un morceau de Terre s'étant séparé de celle-ci sous l'effet d'une vitesse de rotation supposée plus rapide à cette époque, en raison, comme nous l'avons vu, de la conservation du moment cinétique. Toutefois, si l'on veut respecter ce principe, une période de rotation en 4 heures est insuffisante pour éjecter du matériau terrestre en orbite, ce dont George Darwin était conscient. Il avait alors imaginé un mécanisme basé sur l'attraction du Soleil et permettant de faire osciller verticalement du matériau situé à la surface de la Terre, mécanisme invalidé par la suite. Cela n'a pas empêché Alfred Ringwood, dans les années 1960, de ressusciter la théorie de la fission, en suggérant que la migration du fer vers le noyau pouvait avoir fortement diminué la période de la rotation terrestre, jusqu'à environ 2 heures. Cette idée est séduisante, car elle explique la similarité de composition isotopique entre la Terre et la Lune, et l'appauvrissement en fer de la Lune par rapport à la Terre, le matériau éjecté provenant du manteau. Mais elle a aussi un coût exorbitant : elle viole la conservation du moment cinétique. De plus, si la Lune provient effectivement du manteau terrestre, il est difficile d'expliquer pourquoi son propre manteau est plus riche en oxyde de fer que le manteau terrestre.

- **Capture.** Le scénario de la capture, en vogue jusque dans les années 1980, suppose que la Lune s'est formée ailleurs dans le Système solaire, puis que des perturbations gravitationnelles l'ont amenée au voisinage de la Terre où cette dernière l'aurait capturée. Il existe un exemple (probable) de capture de satellite par une planète dans le Système solaire : il s'agit de Triton, le plus gros satellite de Neptune. Son mouvement rétrograde, par rapport aux autres satellites de Neptune, a longtemps

2. Trois hypothèses de formation classiques. (A) Fission. (B) Capture. (C) Co-accrétion.





intrigué les astronomes. L'explication que l'on en donne aujourd'hui est que Triton est un objet de la ceinture de Kuiper capturé par Neptune. Dans le cas de la Terre, le mécanisme de capture est cependant très délicat et difficile à réaliser. Il nécessite que la Lune perde de l'énergie cinétique pour pérenniser sa capture par la Terre. La dissipation par les forces de marée ou des collisions avec une éventuelle ceinture de débris en orbite autour de la Terre peuvent y contribuer, mais cela requiert plus de temps qu'un simple passage. Il faudrait que la Lune se place sur une orbite instable, dont la mise en œuvre demande des conditions très particulières et assez peu probables.

● **Co-accrétion.** Dans sa version initiale, le scénario de la co-accrétion supposait que la Terre et la Lune s'étaient formées simultanément et dans la même région, condition difficile à réaliser en pratique. En effet, les modèles d'accrétion montrent que deux objets situés à proximité l'un de l'autre finissent inévitablement par fusionner. Une variante de ce scénario, proposée par l'astrophysicienne russe Evgenia Ruskol, contourne le problème en supposant que le disque d'accrétion de la Lune serait issu de la collision entre deux planétésimaux au voisinage de la Terre. La plupart des débris engendrés par ces collisions auraient été capturés par la Terre, formant un disque de matière régulièrement approvisionné par la collision d'autres planétésimaux avec ce disque. Toutefois, des calculs détaillés montrent que ce scénario ne permet pas d'expliquer la valeur du moment cinétique du couple Terre-Lune.

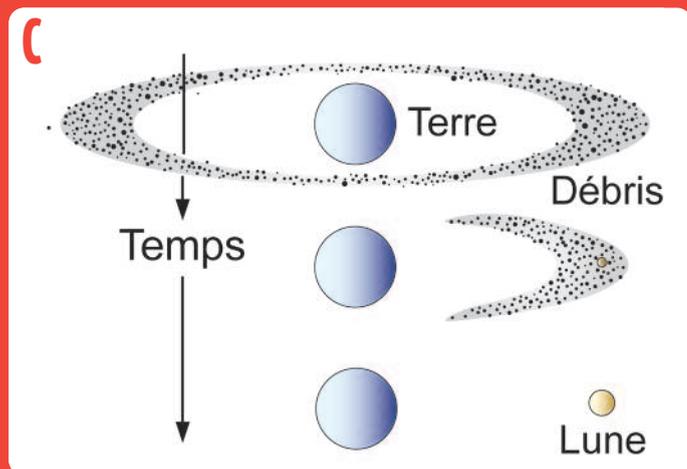
Pas plus l'hypothèse de la capture que celle de la co-accrétion, dans sa version énoncée par Evgenia Ruskol, ne permettent d'expliquer la similarité de composition isotopique révélée par l'analyse des roches lunaires. Selon ces scénarios, en effet, le matériau constitutif de la Lune provient d'autres régions du Système solaire, où la composition isotopique était, a priori, différente de celle du matériau terrestre. Le scénario de la fission explique naturellement cette similarité, mais il bute sur l'enrichissement du manteau lunaire en fer, et surtout, il n'explique pas la valeur du moment cinétique du couple Terre-Lune. En fin de compte, le programme *Apollo* a bien rempli sa mission. Trop bien même, puisque toutes les hypothèses en lice avant l'analyse des échantillons lunaires ont été éliminées après.

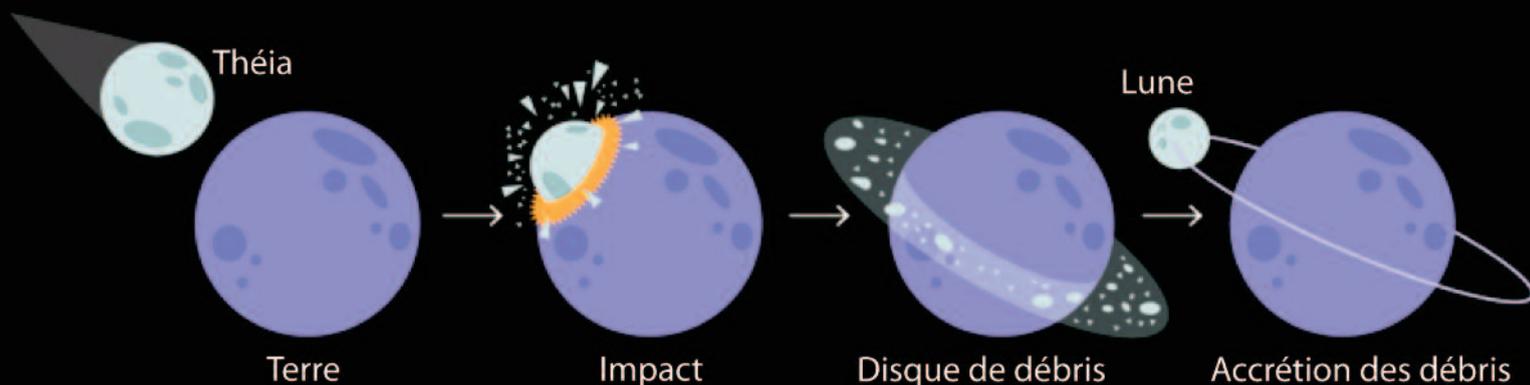
MOMENT CINÉTIQUE

Selon les cas, le moment cinétique (ou angulaire) comporte des termes liés à la rotation sur eux-mêmes (rotation propre) des différents éléments du système, et à leur rotation autour d'un axe fixe (révolution). Les termes de rotation propre s'expriment en fonction de la vitesse de rotation et de la répartition interne de masse (moment d'inertie), tandis que les termes de révolution autour d'un axe s'expriment en fonction de la masse de l'objet, ainsi que de sa vitesse et de sa distance par rapport à l'axe de rotation. La conservation (dans le temps) du moment cinétique d'un système isolé est l'un des grands principes de conservation de la physique. En mécanique céleste, la loi des aires est une conséquence directe de cette conservation. La valeur actuelle du moment cinétique Terre-Lune, que se doivent de respecter les théories de formation de la Lune, est de $3,5 \times 10^{34} \text{ kg m}^2/\text{s}$.

Le moment cinétique du système Terre-Lune comporte trois termes décrivant respectivement les rotations propres de la Terre et de la Lune, et la révolution de la Lune autour de la Terre. Le centre de masse du système Terre-Lune ne coïncidant pas avec le centre de la Terre, il faudrait, en toute rigueur, ajouter un terme décrivant la révolution de la Terre autour de ce centre de masse. Ce terme est toutefois négligeable. Si l'on considère que le système Terre-Lune est isolé, son moment cinétique doit rester constant au cours du temps avec, pour conséquence intéressante, l'éloignement progressif de la Lune. En effet, la diminution de la vitesse de rotation de la Terre, liée aux effets de marée, induit une diminution du moment cinétique lié à la rotation propre de la Terre. Pour compenser cette perte, la Lune s'éloigne de la Terre, ce qui augmente le moment cinétique décrivant le mouvement de la Lune autour de la Terre. On dit que la Terre transfère du moment cinétique à la Lune.

Le moment cinétique de la proto-Terre est modifié lorsque celle-ci entre en collision avec un autre objet. Le moment cinétique du système formé par la proto-Terre et son éventuel satellite dépend des caractéristiques de l'impact (notamment de l'angle d'impact), et des propriétés (masse et vitesse) de l'impacteur. En fait, le système Terre-Lune n'est pas totalement isolé et, après sa formation, il peut modifier son moment cinétique par un mécanisme de transfert vers le Soleil impliquant la précession de la périégée de l'orbite lunaire. Plus précisément, lorsque la période de cette précession est égale à une année terrestre, il s'établit un phénomène de résonance dont l'une des conséquences est un transfert de moment cinétique vers le Soleil. Peu après la formation de la Lune, la période de précession de son orbite devait être relativement courte. Elle s'est ensuite allongée, si bien qu'une résonance s'est sans doute produite dans la jeunesse du système Terre-Lune. Toutefois, la plupart des spécialistes de ce sujet pensent qu'une telle résonance n'a pu se maintenir que pendant un temps relativement bref, insuffisant pour diminuer le moment cinétique du système Terre-Lune de façon significative.





3. Le scénario simplifié de l'impact géant.

L'HYPOTHÈSE DE L'IMPACT GÉANT : RENCONTRE AVEC THÉIA

Vers le milieu des années 1970, une autre hypothèse a émergé, celle de l'impact géant (fig. 3) [5]. Selon cette hypothèse, la Terre, ou plus précisément la proto-Terre, serait entrée en collision avec un objet de la taille de Mars baptisé Théia, du nom de la déesse grecque mère de Séléné. Cette collision aurait projeté en orbite un disque de matière, constitué en partie par des résidus de Théia et en partie par du matériau excavé du manteau terrestre. La Lune se serait ensuite formée à partir de ce disque de débris.

Les tailles actuelles de la Terre et de la Lune, et la valeur du moment cinétique du couple Terre-Lune imposent des contraintes sur la taille de Théia, ainsi que sur la vitesse et l'angle d'impact. La taille de Théia devait être l'ordre de celle de Mars, sa vitesse de l'ordre de 4 km/s et l'angle d'impact voisin de 45°. L'abondance actuelle du manteau terrestre en certains éléments réfractaires apporte une contrainte plus terre à terre, pour placer un petit jeu de mots, mais importante: selon une étude menée par James Badro, de l'Institut de physique du globe de Paris, elle place une limite supérieure à ne pas dépasser pour la taille de Théia, autour de 15 % de la masse terrestre [6].

Le scénario de l'impact géant est très séduisant, car il permet d'expliquer plusieurs observations, notamment le moment cinétique élevé du système Terre-Lune, la quasi-absence d'éléments

volatils sur la Lune, son appauvrissement global en fer et, dans certaines limites que nous allons bientôt rencontrer, la similarité de composition isotopique. De plus, l'énergie libérée lors de la collision est suffisante pour maintenir un océan magmatique sur la Lune, juste après son accréation. Un impact géant pourrait aussi être à l'origine de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. Enfin, l'hypothèse d'un impact géant est tout à fait plausible dans le cadre des modèles de formation et d'évolution du Système solaire. Selon ces modèles, de nombreuses petites pla-

lations sont fondées sur des modèles hydrodynamiques dans lesquels les planétésimaux sont formés de collections d'un grand nombre de particules, dont on étudie l'évolution suite à un impact. Certaines propriétés, comme la température de chaque particule, peuvent aussi être calculées, ce qui fournit de précieuses informations sur le matériau utilisé pour fabriquer la Lune.

UNE SIMILARITÉ ISOTOPIQUE TROP PARFAITE

Paradoxalement, ces simulations ont également enfoncé un coin dans le scénario de l'impact géant, en montrant que, si elle résultait d'une telle collision, la Lune devrait être composée de 70 à 80 % par du matériau provenant de l'impacteur, Théia, le reste seulement provenant du manteau de la proto-Terre. Cette prédiction est en désaccord avec la similarité de composition isotopique entre la Lune et la Terre. Sauf, bien sûr, si l'on suppose que la composition de Théia était semblable à celle de la Terre, ce qui semble peu probable. Dans ce cas, en effet, comment expliquer que les compositions isotopiques des météorites, et en particulier des météorites martiennes, soient si différentes de celles de la Terre et de la Lune? Comme nous l'avons remarqué, cette observation suggère plutôt que les compositions des planétésimaux dépendaient de la distance au Soleil à laquelle ils s'étaient formés. Même si Théia et la proto-Terre se sont formées dans

Le scénario de l'impact géant est très séduisant car il permet d'expliquer plusieurs observations.

nètes devaient circuler autour du Soleil à cette époque, rendant les collisions inévitables.

Des simulations numériques réalisées à partir des années 2000, en particulier par l'astrophysicienne américaine Robin Canup, ont démontré la faisabilité du scénario de l'impact géant (fig. 4). Ces simu-

des régions voisines, leurs compositions devaient avoir des signatures isotopiques légèrement différentes. Loin de baisser les bras, les scientifiques ont exploré de nombreuses pistes et proposé plusieurs solutions pour résoudre ce problème.

Tout d'abord, sommes-nous bien certain que, dans le Système solaire interne, la composition isotopique ait varié en fonction de la distance au Soleil? Cette hypothèse repose principalement sur l'analyse de quelques météorites martiennes. Mais, selon certains modèles d'évolution du Système solaire, Mars n'aurait pas pu se former à sa position actuelle, et proviendrait d'une région plus lointaine. Le Système solaire interne, lui, pourrait avoir été plus homogène d'un point de vue isotopique. La solution à ce problème se trouve sans doute sur Vénus. La question scientifique se transforme ainsi en défi technologique: ramener sur Terre des échantillons de roches vénusiennes n'est pas une mince affaire.

Si l'on s'en tient à l'idée que la composition isotopique initiale dépendait bien de la distance au Soleil, le problème revient à éjecter plus de matériau terrestre en orbite et/ou à créer des conditions post-impact permettant une homogénéisation presque parfaite entre le matériau excavé de la proto-Terre et celui de Théia. Bref, à augmenter l'énergie libérée lors de la collision, ce que l'on peut faire en modifiant soit la configuration de l'impact, soit la masse de Théia, ou bien les deux. Certains scientifiques avancent donc l'idée que Théia avait une masse comparable à celle de la proto-Terre ou qu'elle a heurté la proto-Terre avec une vitesse plus élevée que dans le scénario classique. Dans les deux cas envisagés, l'énergie libérée par la collision est plus élevée et la quantité de matériau terrestre excavé est plus grande. Cependant, le moment cinétique du système Terre-Lune est, lui aussi, plus grand, et il devient difficile d'expliquer sa valeur actuelle. Il faut alors invoquer un mécanisme permettant de réduire ce moment, impliquant par exemple un transfert de moment cinétique vers le Soleil (voir encadré). Enfin, si les calculs de James Badro sont exacts, Théia ne pouvait pas être plus massive que Mars, et l'hypothèse d'un gros impacteur doit être écartée.

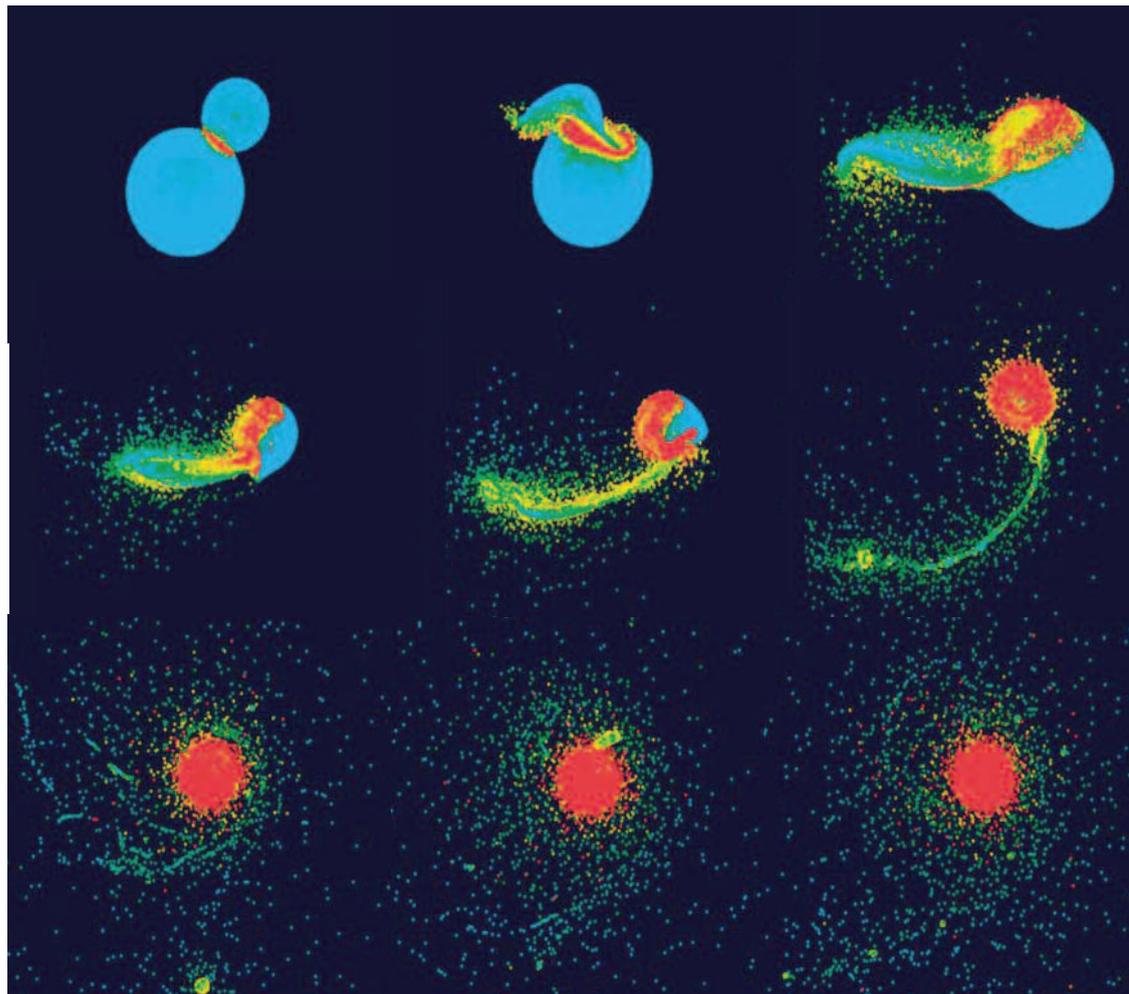
Parallèlement, des mesures réalisées sur les isotopes du zinc relativisent la portée de la similarité isotopique observée pour d'autres éléments [7]. Elles montrent que, par

rapport aux roches terrestres, les roches lunaires contiennent moins de zinc, mais qu'elles sont proportionnellement enrichies en isotopes lourds de cet élément (^{66}Zn et ^{68}Zn). Par ailleurs, la composition isotopique initiale du zinc semble avoir été homogène à l'échelle du Système solaire interne (dans un diagramme $\delta^{68}\text{Zn}$ vs $\delta^{66}\text{Zn}$, la Terre, la Lune et Mars se situent sur une même droite), si bien que les différences d'abondances entre différents objets que l'on observe aujourd'hui reflètent des différences dans les mécanismes de formation entre ces objets, et non des différences de compositions initiales. Or, le zinc subit un fort fractionnement isotopique lorsqu'il se volatilise, les isotopes les plus légers étant perdus. Autrement dit, si la Lune s'est formée à partir des débris d'un impact au cours duquel une partie du matériau mis

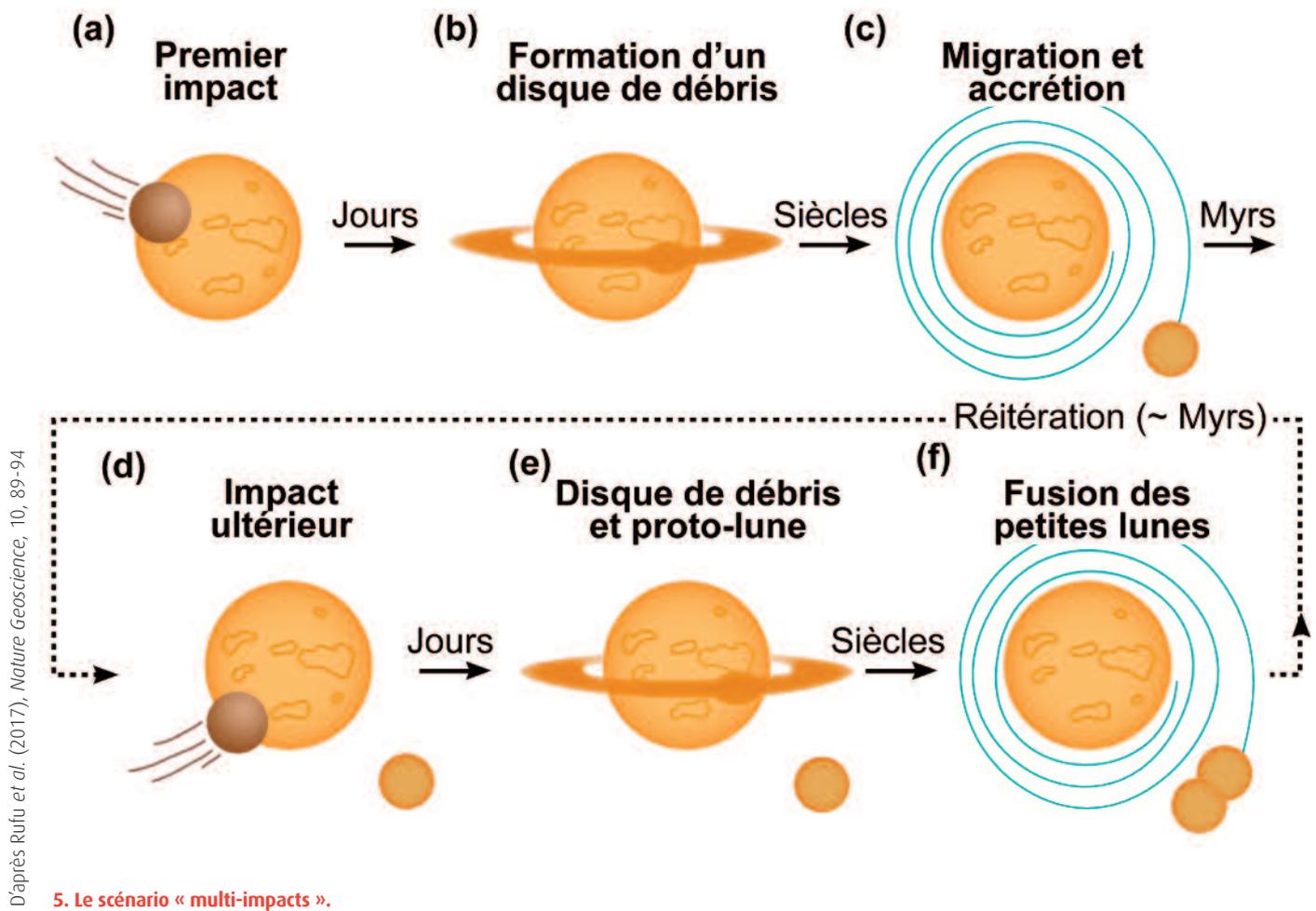
en orbite s'est volatilisée, elle devrait être enrichie en ^{66}Zn et ^{68}Zn . C'est précisément ce que montrent les mesures.

VARIANTES

Une autre solution remet en cause l'idée d'un impact géant unique et la remplace par une série d'impacts avec des planétésimaux plus petits que Théia, chacun de ces objets ayant une masse comprise entre 1/100 et 1/10 de la masse actuelle de la Terre, et espacés les uns des autres de quelques millions d'années (fig. 5). Chaque impact éjecte en orbite un disque de matière à partir duquel un petit satellite se forme, avant d'entamer une migration qui l'éloigne de la Terre. Se faisant, il se rapproche du petit satellite formé lors de la collision précédente, et finit par fusionner avec lui. Cette variante avait été



4. Simulation d'un impact géant entre la proto-Terre et un objet de la taille de Mars. Le temps écoulé (en heure) depuis l'impact est indiqué en haut de chaque vignette. Le nombre de particules utilisées pour reproduire cet impact est de 120 000. Le code de couleur représente la température de chaque particule à un instant donné. (D'après Canup et al. (2004), *Icarus*, 168, 433-456. © 2003, Elsevier Inc.)



proposée dès les années 1980, et des simulations numériques ont récemment démontré sa faisabilité [8]. Elle résout le problème de la similarité de composition isotopique par un effet de dilution : puisque les compositions des impacteurs sont a priori différentes les unes des autres, la trace individuelle laissée par un impacteur particulier est, à l'inverse de celle de la Terre, peu visible dans la composition finale de la Lune.

La dernière variante en date du scénario de l'impact géant implique un nouveau type d'objets, la *synestia* (fig. 6) [9]. Selon ce scénario, développé par des chercheurs de Harvard et de l'université de Californie, l'impact aurait libéré suffisamment d'énergie pour vaporiser Théia et l'ensemble du manteau terrestre, créant un immense nuage de plasma. Ce nuage a globalement la forme d'un tore, à ceci près qu'il est connecté, en son centre, au noyau de la proto-Terre, qui

a lui survécu à l'impact. L'ensemble nuage plus noyau résiduel forme une *synestia*. Toujours selon cette hypothèse, les régions externes de la *synestia* se refroidissent assez rapidement en rayonnant de l'énergie vers l'extérieur. Du matériau s'y condense, puis migre vers l'intérieur de la structure où il est utilisé pour fabriquer la Lune par accrétion. Parallèlement, la *synestia* se rétrécit, et

la Lune arrête de croître lorsque la taille de la *synestia* devient plus petite que l'orbite lunaire. Ce scénario explique bien la composition de la Lune. Mais comme les autres scénarios de haute énergie, il requiert qu'un mécanisme soit venu réduire le moment cinétique du Système Terre-Lune peu de temps après la formation de celui-ci.

ET VÉNUS ?

Un dernier petit crochet par Vénus, avant de conclure. Le scénario de l'impact géant, sous l'une ou l'autre de ses formes, laisse en suspens la question posée au début de cet article : si les collisions entre petites planètes étaient fréquentes dans la jeunesse du Système solaire, pourquoi la Terre est-elle la seule planète tellurique à posséder un gros satellite ? Comment se fait-il, par exemple, que Vénus, qui est très proche de la Terre par sa taille, n'ait pas subi un tel impact et qu'elle ne possède

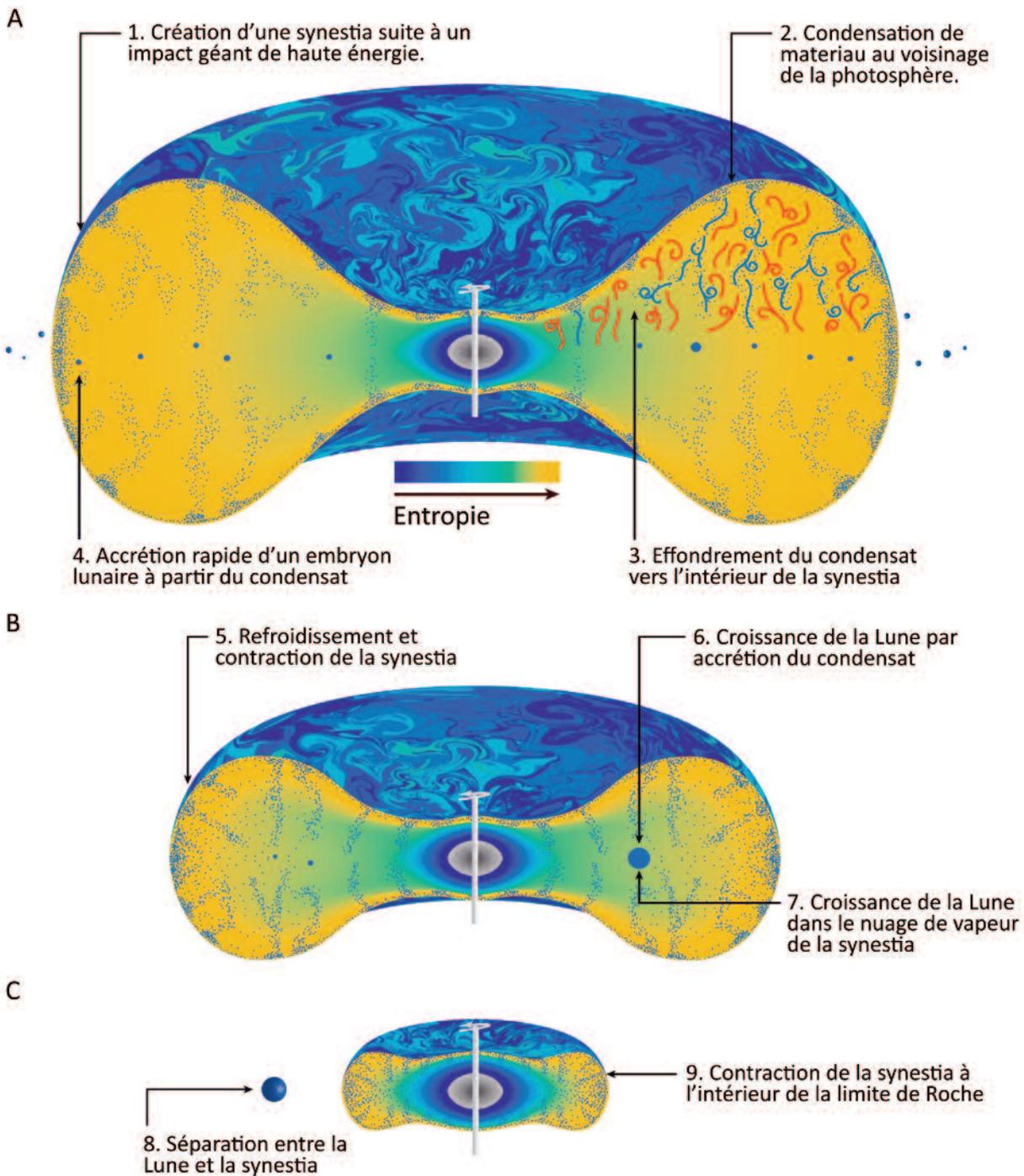
Pourquoi la planète Terre est-elle la seule planète tellurique à posséder un gros satellite ?



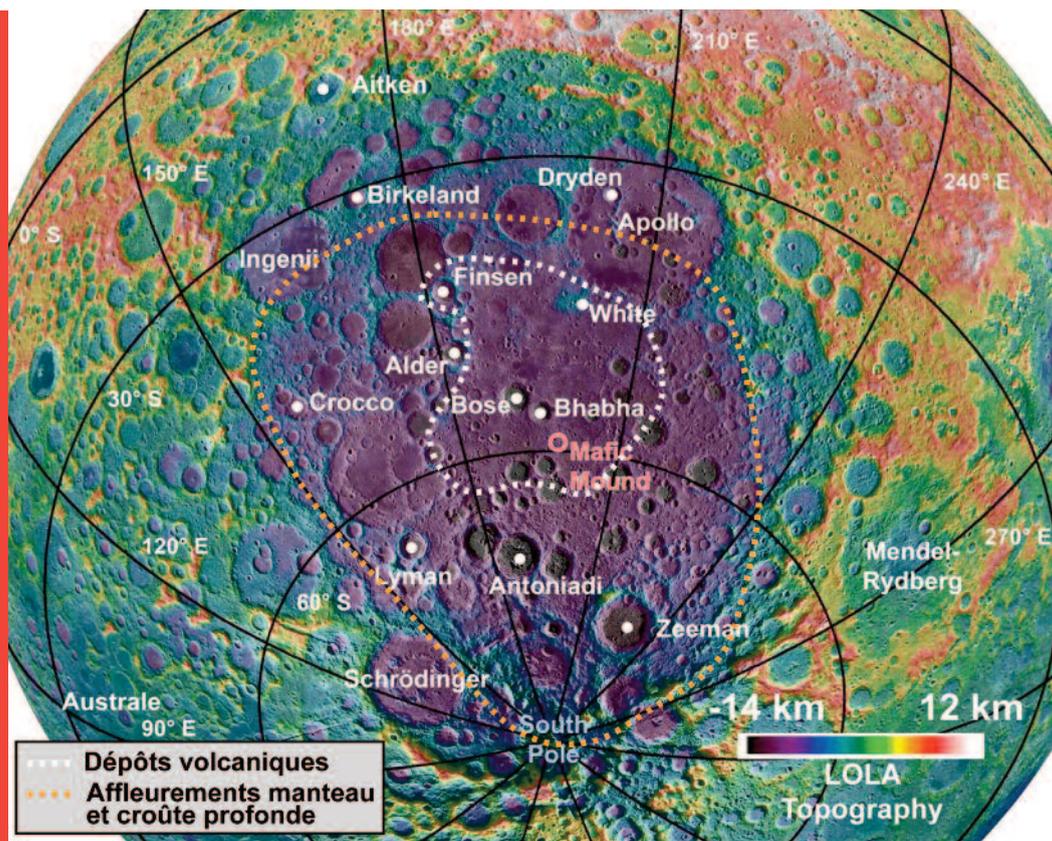
pas de gros satellite? Selon certaines théories, Vénus aurait bien subi une collision dans sa jeunesse. Cela se serait même produit deux fois. Lors de la première collision, un satellite se serait effectivement formé et se serait mis à orbiter autour de Vénus, s'éloignant d'elle sous l'effet des forces de marée. Mais la seconde collision aurait été fatale à ce satellite, car elle aurait aussi modifié la direction de rotation de Vénus [10].

Dans ces conditions, les forces de marée ont l'effet inverse sur l'orbite du satellite et tendent à rapprocher celui-ci de Vénus. Conséquence inévitable, le satellite finit par traverser la limite de Roche et par se disloquer, les débris retombant progressivement sur Vénus. L'étoile du Berger aurait ainsi possédé un compagnon dans un passé lointain, mais pendant une dizaine de millions d'années seulement.

6. Évolution d'une synestia terrestre consécutive à un impact géant. La Lune se forme à l'intérieur de la synestia par migration et accrétion du condensat issu du refroidissement des régions périphériques. (D'après Lock et al. (2018), *Journal of Geophysical Research Planets*, 123, 910-951)



7. Carte topographique du bassin Aitken et de sa région, réalisée à partir des mesures de l'altimètre LOLA embarqué sur la sonde LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter). Les données spectrales fournies par la sonde Indienne Chandrayaan-1 ont permis de déterminer la composition des roches de surface dans cette région. La zone centrale, délimitée par la ligne pointillée blanche, contient des dépôts volcaniques qui pourraient avoir été mis en place peu après l'impact à l'origine d'Aitken. Elle est entourée d'une zone contenant de grandes quantités de pyroxène (ligne pointillée orange), un minéral riche en magnésium et qui pourrait provenir du manteau lunaire. Au-delà, les pyroxènes se mêlent aux minéraux de la croûte. (D'après Moriarti et Pieters (2018), *Journal of Geophysical Research Planets*, 123, 729-747)



ET POURTANT, ELLE EST BIEN LÀ

La Lune n'a pas livré tous ses secrets. Sa formation reste mal comprise, et le scénario de l'impact géant, qui est privilégié aujourd'hui, comporte des zones d'ombre. Un retour sur la Lune permettrait d'étudier un éventail de roches lunaires plus large, avec pour objectif de confirmer ou de modérer la similarité isotopique Terre/Lune. Les scientifiques souhaiteraient notamment analyser des roches plus représentatives du manteau lunaire. De telles roches pourraient avoir été excavées lors de gros impacts, et sont peut-être aujourd'hui présentes dans les grands bassins d'impact, en particulier Aitken (fig. 7), qui se situe au pôle Sud, sur la face cachée. Autre enjeu que nous avons brièvement évoqué : déterminer l'origine de l'eau lunaire. Est-elle cométaire, et donc contemporaine du bombardement tardif, ou bien date-t-elle de la formation de la Lune, ce qui poserait un problème supplémentaire pour le scénario de l'impact géant ? Ici encore, la réponse se trouve sans doute aux pôles.

Une chose est sûre, cependant : la Lune est bien là. Selon certains scientifiques, elle pourrait même avoir sa part de responsabilité dans le développement de formes de vie complexes à la surface de la Terre, en permettant de maintenir l'incli-

raison de l'axe de rotation de notre planète autour de 23°, et donc d'éviter de trop fortes et fréquentes variations climatiques. La valeur de cette inclinaison pourrait même avoir été fixée par l'impact géant, si la Lune résulte bien d'un tel événement. Quelques milliards d'années après sa formation, c'est précisément une forme de vie complexe, *Homo sapiens*, qui est allée se promener sur son sol et qui se pose des questions sur son origine. ■

[1] Les masses volumiques décomprimées, c'est-à-dire corrigées des effets de la pression, de la Terre et de la Lune valent respectivement 4 100 et 3 300 kg/m³. [2] Les rapports isotopiques « deltas » sont obtenus en deux temps. D'abord, on mesure le rapport d'abondance R par rapport à l'isotope le plus fréquent (ici ¹⁶O), par exemple, pour ¹⁷O, $R = \frac{^{17}\text{O}}{^{16}\text{O}}$. Puis on compare le rapport obtenu pour chaque échantillon avec un rapport de référence (ici, la composition isotopique moyenne des océans terrestres, R_{SMOW}), par exemple, pour ¹⁷O, $\delta^{17}\text{O} = (R - R_{\text{SMOW}}) / R_{\text{SMOW}}$. [3] L'origine des mers lunaires est différente. Pendant la phase d'océan magmatique, les cristaux d'olivine, plus lourds, sédimentent au fond de l'océan et forment les roches du manteau lunaire. Plus tard, lors du bombardement tardif, ce manteau refond localement sous l'effet de gros impacts. Le magma basaltique ainsi produit percole au travers de la croûte fracturée et amincie, puis vient remplir les cratères créés par les impacts, formant les mers lunaires. Ces basaltes sont riches en fer et en titane et contiennent notamment des cristaux d'ilménite.

[4] Ses travaux sur les marées l'ont naturellement amené à étudier les frictions générées par ces marées et les conséquences de celles-ci, à savoir le

ralentissement de la rotation de la Terre et l'éloignement de la Lune. Parmi les autres travaux de George Darwin, on peut citer une meilleure description de la forme (la figure) de la Terre, et en astronomie, des travaux innovateurs sur les étoiles doubles. [5] Une première version de ce scénario, avec un impacteur de la taille de la Lune, a été publiée en 1975 par William Hartmann et Donald Davis. Alastair Cameron et William Ward ont ensuite amélioré ce scénario en supposant que l'impacteur avait la taille de Mars, ce qui est plus en accord avec le moment cinétique actuel du couple Terre-Lune. [6] James Badro et ses collègues se sont intéressés plus particulièrement à 4 éléments : le cobalt, le vanadium, le nickel, et le chrome. Leurs résultats ont été publiés dans Piet *et al.* (2017), *Geophysical Research Letters*, 44, 11770-11777. [7] Voir Paniello *et al.* (2012), *Nature*, 490, 377-379. [8] Voir Rufu *et al.* (2017), *Nature Geoscience*, 10, 89-94, et le compte rendu de cet article dans *l'Astronomie* 104 d'avril 2017. [9] Comme nous allons le voir, une synestia est un objet hypothétique résultant de la collision entre deux planètes. Elle est formée d'un noyau essentiellement métallique entouré d'un tore de roches vaporisées, le tout étant animé d'une rotation rapide. La formation d'une synestia terrestre suite à un impact géant et son évolution est décrite dans un long article paru début 2018: Lock *et al.* (2018), *Journal of Geophysical Research Planets*, 123, 910-951. [10] Contrairement aux autres planètes (excepté Uranus), Vénus et animée d'un mouvement de rotation rétrograde, c'est-à-dire qu'elle tourne sur elle-même dans le sens inverse de sa révolution autour du Soleil. Par ailleurs, sa vitesse de rotation propre est très faible, puisqu'elle accomplit un tour sur elle-même en 243 jours terrestres.